CN 53-1189/P ISSN 1672-7673

南山站的光学观测环境监测与分析*

胡 平[1,2]，李 锐[1,3]，王 娜[1,3]，魏 鹏[1]
(1. 中国科学院新疆天文台，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 新疆大学，新疆 乌鲁木齐 830046；
3. 中国科学院射电天文重点实验室，江苏 南京 210008)

摘要：为分析南山站的光学观测环境条件，在南山观测站使用 SBIG、SQM-LE 等设备分别对大气视宁度、夜天光亮度和气象数据进行长期监测，在筛选和整理大量监测数据的基础上，进行逐月、逐年的统计和分析。结果显示，使用 SBIG 视宁度仪监测南山站年平均视宁度为 1.74″，夜天光亮度为 21.7 mag arcsec^{-2}，年平均温度为 3.4 ℃，年平均相对湿度为 57.3%，风速主要分布区间为 2~3 m/s，主要风向为西南风。上述参数表明，南山观测站的光学观测环境良好，可以满足中、小型望远镜的观测环境要求，测量结果可为其他光学台址起参考作用。

关键词：光学观测环境；大气视宁度；夜天光亮度；气象参数
中图分类号：P11　**文献标识码**：A　**文章编号**：1672-7673(2017)04-0495-07

为获得高质量的光学星像，不仅要求望远镜在大口径的前提下保证设计完善和加工精准，而且要安装在光学观测环境好的台址。衡量台站光学观测环境质量的因素有很多，主要可分为两方面：(1)大气因素，主要包括：大气视宁度[1]和夜天光亮度[2]；(2)气象因素，主要包括：大气水汽含量、晴夜数、温度、空气相对湿度、风速、风向。

大气视宁度是衡量台站光学观测环境质量的重要参数，是在大气湍流的影响下对星光产生的综合作用结果。目标点源星像经过圆形口径的光学系统所成的像并不是理想的像，因为衍射极限的存在使得它变成一个由中心亮斑和围绕它的衍射环组成的夫琅禾费衍射斑。星光在到达地面望远镜前需经过处于湍流状态的地球大气，大气的密度和温度时刻发生变化，导致大气折射率变化进而引起光波波前改变，此时的星像在密度、形状、位置上发生变化，不再是稳定的夫琅禾费衍射斑，其衍射环被破坏，中心亮斑变得大而模糊，整个星像不规则地迅速移动和闪烁。大气视宁度是评价望远镜台址质量的重要指标，对台址的大气视宁度进行监测，分析视宁度随时间、季节的变化，可确保望远镜的工作效率和观测数据的质量。目前，国际上已勘选出许多观测条件优秀的天文台址，如夏威夷的 Mauna kea、智利北部 Paranal、西班牙 La Palma，这些台址的视宁度都低于 1″，其中 Mauna kea 甚至能达到 0.5″。一般而言，如果台址一年四季的平均视宁度为 1″ 左右[3]，就可以看作是较优秀的台址。

夜天光亮度是评价光学台址观测质量的重要参数之一，直接影响观测的极限星等和观测精度，其来源一部分源于地面以上的自然光，包括大气外来的未分辨的星光、弥漫银河光、黄道光等，另一部分则是人为光源，比如城市灯光等。观测表明，太阳活动对夜天光长时标的变化也有明显的影响，即太阳活动剧烈时，夜天光亮度增加，反之减小。自然天光无法避免而光污染是人为造成的，选址中的夜天光亮度测量有助于确定天光背景，而后期对台址夜天光亮度监测，则能定量分析人为原因造成的光污染，保护天文台址。对于夜天光亮度的测量，如果 V 波段的夜天光亮度达到 21.5~22.0 mag arcsec^{-2}，就可以看作是优良的台址。

另外，客观存在的气象因素对观测的影响不可忽视，温度的变化能够影响近地气流变化从而影响

* 基金项目：中国科学院战略性先导科技专项(B 类)(XDB09000000)；国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB857100)资助.
收稿日期：2017-03-08；修订日期：2017-03-28
作者简介：胡 平，男，硕士. 研究方向：光学台址观测环境研究. Email：huping@xao.ac.cn
通讯作者：王 娜，女，研究员. 研究方向：射电天文与方法. Email：na.wang@xao.ac.cn

观测质量，适宜的温度是光学观测系统正常工作的保证，相对空气湿度不大于 60% 以及平稳风速与风向更是开展光学观测的重要前提。

南山观测站位于乌鲁木齐县甘沟乡，海拔 2 080 m，当地气候属于典型温带大陆型气候，干燥少雨，夏季和冬季都无极端天气出现，常年无极端大风。自 2004 年开展光学观测以来，目前已有多台光学望远镜运行，如 2012 年安装完成的 1 m 大视场光学望远镜系统，用于开展光学时域天文和空间目标与碎片的观测研究。为配合光学观测工作的进行，2010 年在南山站安装光学环境监测系统，包括 SBIG 视宁度仪①、夜天光亮度测量计(Sky quality meter-LE，SQM)②、鱼眼云量相机。另外，配合监测的设备还包括 2006 年安装的 PC-4 型自动气象站，用于测量温度、相对湿度以及风速和风向数据。本文着重对以上长期监测数据进行统计分析处理，为评估南山站的光学观测环境提供量化数据。

1　观测原理与方法

1.1　大气视宁度

表征视宁度的物理量有很多。早期采用照相拖影的方法测量大气视宁度，具体是以星像拖影轨迹的抛物线拟合方差 σ 表征[4]，σ 越小表明视宁度越好。现代天文台址使用 SBIG、DIMM 等设备测量大气视宁度，测量结果主要以星像亮度半峰值全宽(Full Width at Half Maximum，FWHM)和大气光学湍流参数——大气相干长度 r_0[5] 表征。测得视宁度 FWHM 值越小，表明视宁度越好，而 r_0 值越小，表明视宁度越差。星像亮度半峰值全宽若忽略机械振动且望远镜达到衍射极限，与 r_0 有如下关系：

$$FWHM = 0.98\frac{\bar{\lambda}}{r_0}\ ,\tag{1}$$

大气相干长度 r_0 定义为：

$$r_0 = 0.185\lambda^{\frac{6}{5}}(\sec\psi)^{-\frac{3}{5}}\left[\int C_n^2(h)\,\mathrm{d}h\right]^{-\frac{3}{5}},\tag{2}$$

其中，λ 为波长；ψ 为天顶角；$C_n^2(h)$ 为折射率结构常数的高斯分布；h 为测站高度。折射率结构常数 C_n^2 主要由温度起伏决定，即

$$C_n = 7.9\times10^{-7}\frac{P}{T^2}C_{\mathrm{T}}\ ,\tag{3}$$

其中，C_{T} 为温度结构常数；P 为气压，单位为 Pa；T 为温度，单位为 K。

在众多影响光学天文观测的参数中，大气视宁度的测量相对复杂，测量方法也较多。下面介绍几种通过测量星像破坏和星像运动得到大气视宁度的方法。早期观测视宁度是通过 Danjon[6] 方法目视直接观测星像的破坏程度，并由破坏程度的分级推算大气湍流角作为大气视宁度好坏的衡量，这一方法后来被证明存在缺陷，即忽略了星像运动而只关注星像的破坏。文[7]提出的拖影方法估计大气视宁度，即通过测量星像随周日运动在底片上留下“拖影”的抖动程度测量视宁度。后来拓展为使用望远镜拖影测量，北半球则广泛使用 SBIG 视宁度仪以北极星为目标星进行拖影，并通过计算机程序能够直接计算得半峰值全宽，即大气视宁度。到了 20 世纪 80 年代，开发出较差 Hartmann 视宁度监视仪，即按照 Stock 原理，通过统计单星像经瞳孔平面上两个小孔径所成像的相对运动实时测量整个大气湍流强度，即大气视宁度。1986 年，文[8]根据该原理研制出视宁度监测仪 DIMM[9]，是目前测量视宁度较为精确的方法之一。DIMM 可观测(2)式中的 r_0，并且不存在跟踪误差，测量结果有效性高，但目前还不能实现使用 DIMM 长期在无人值守状态下的监测。

---

① https://www.optcorp.com/pdf/SBIG/SeeingMonitorManual.pdf

② http://unihedron.com/projects/sqm-le/

南山观测站对大气视宁度的监测选用 SBIG 视宁度仪，配备焦距为 150 mm，焦比为 $F/5.3$，非制冷、无快门的 ST-402ME 天文相机，整个装置安装在一个带有透明窗口的防雨金属盒中，窗口指向北极星。北半球以北极星为目标星，观测时目标星轨迹一直在仪器视场中，无需跟踪，由计算机程序直接实时获得天顶的视宁度半峰值全宽，长期监测能够获取大量视宁度资料进行统计分析。本文大气视宁度的观测记录时间为 2010 年 7 月至 2012 年 1 月。

1.2　夜天光亮度

2011 年，南山观测站开始使用 Unihedron 公司的夜天光亮度测量计测量在可见光波段的夜天光亮度。该设备被广泛应用于区域光污染监测工作，体积仅为 3.6×2.6×1.1 立方英寸，采样时间最小为 1 s，最大为 80 s，经校准后观测绝对精度为 ±10%，夜天光亮度 A(magarcsec^{-2})其与绝对亮度 F(cd/m^2)存在如下转换关系：

$$A = 12.41 - 2.5\log F\,. \tag{4}$$

天文台址使用夜天光亮度测量计能够获得常年的夜天光亮度监测数据，监测中不区分晴和阴以及有月夜和无月夜，为了能够通过这些数据统计获得更客观的夜天光亮度，首先需要选择全晴夜晚的观测数据，因为云、雨、雪等天气对观测结果的影响很大。其次是只统计全晴夜晚的无月夜数据。根据每天的观测记录数据可以发现，月光是可见光波段的天光亮度增加的主要原因。本文通过观测气象日报并结合当日的数据质量选测出全晴夜的观测数据，利用贝塞尔公式剔除粗大误差，即剔除天光亮度数据中过高的数据，最后只统计每日观测天光亮度的最大值均值做为台址在一段时间内的夜天光亮度水平，这样基本避免了有月夜的数据影响。本文夜天光亮度数据记录时间为 2011 年 1 月至 2013 年 12 月。

1.3　气象因素

对于南山站的气象数据监测，选用技术符合气象观测规范的 PC-4 型自动气象站，该设备广泛应用于气象、海洋环境监测、水利等领域，可采集温度、相对湿度、风速、风向、太阳辐射等数据，工作稳定且精度高，各要素测量分辨率分别为：温度 0.1 ℃、相对湿度 0.1%、风速 0.1 m/s、风向 3°。2006 年，在南山观测站安装了此自动气象站，该设备同时配备温度、湿度、风速、风向传感器，其中温、湿度传感器距离地面高度 1.5 m，风速和风向传感器距离地面高度 10 m，各项数据采集时间间隔均设置为 1 min。

2　观测结果

通过对南山站采集的大量视宁度资料进行统计，获得南山站大气视宁度数据的主要分布区间。使用 SBIG 视宁度仪每分钟能够采集数据 9 次，电脑记录为每分钟采集数据的中值。图 1 给出南山站大气视宁度数据统计分布，共采集观测数据 156 061 组，视宁度优于 1″ 占 5%，优于 1.5″ 占 38%，统计均值 1.74″，中值 1.67″。

图 2 给出视宁度每月统计均值的变化情况，8 月以后视宁度月均值呈变好趋势，到 11 月视宁度条件则突然变差，从观测当日的气象观测记录发现，2010 年 11 月阴天居多，这使得仪器记录数据相对偏高，而 2011 年 11 月视宁度均值则只有 1.37″，可以看出 SBIG 视宁度仪对天气因素的影响敏感，所以获得较为精确的统计数据需要选择天气情况佳的观测数据。通过曲线的整体趋势发现，秋季、冬季视宁度优于春季、夏季。视宁度月均值的最差值出现在 2 月为 2.02″，最好值出现在 10 月为 1.51″。

图 3 给出南山观测站各月大气视宁度夜间时段的均值变化情况。具体统计各月每小时时间区间内的视宁度均值，各时段均值统计不少于 25 天的数据资料量。南山站的视宁度夜间变化整体较平稳，其中 5 月、7 月、8 月、9 月出现黑夜与白昼转换时视宁度变差的现象。变差的原因可能是 SBIG 视宁度仪本身对于风的影响比较敏感，而在夜昼转换过程中温度变化比黑夜时大，造成近地空气流动，使得仪器记录的视宁度值偏大，视宁度条件变差。

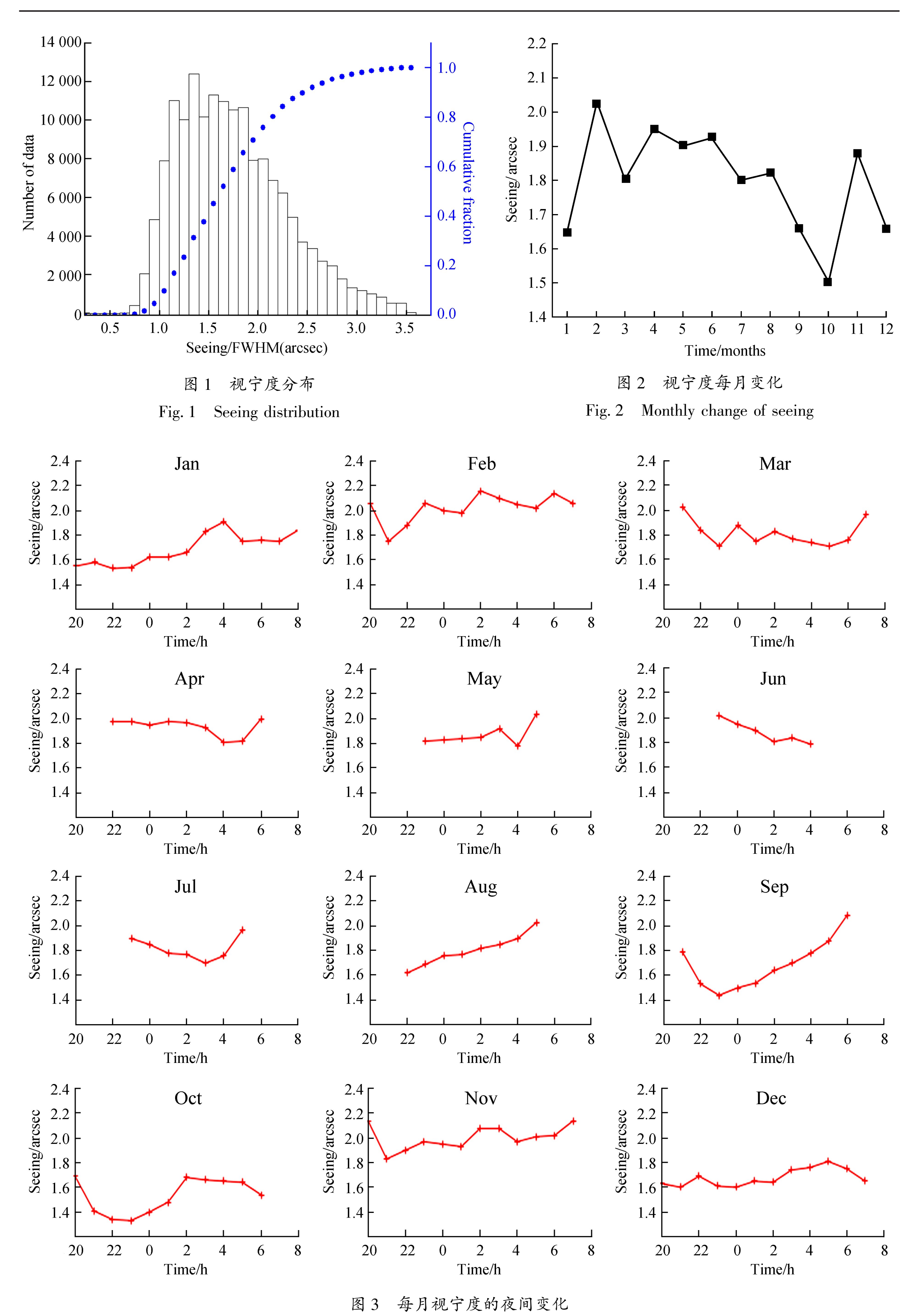


图 1 视宁度分布

Fig. 1 Seeing distribution

图 2 视宁度每月变化

Fig. 2 Monthly change of seeing

图 3 每月视宁度的夜间变化

Fig. 3 Monthly night change of seeing

根据 2011 年至 2013 年的气象观测记录以及每天夜天光亮度数据的记录情况，共选出 375 天全晴夜观测数据，图 4 给出这期间全晴夜夜天光亮度数据的统计分布结果，统计显示，夜天光亮度主要布在 21.4～22 mag arcsec^{-2} 区间，在这 375 天的观测数据中，可见光波段夜天光亮度均值大于 21.5 mag arcsec^{-2} 达 157 天。图 5 给出根据气象日志筛选的全晴夜夜天光亮度监测数据的记录情况，图中显示，记录的可见光波段的夜天光亮度甚至能够达到 23 mag arcsec^{-2}，出现这样的情况是因为仪器在记录数据的过程中遇到观测天区有时有云或者冬天积雪覆盖仪器的情况，使得记录的数据偏大，对于此类数据在数据处理过程中将其作为粗大误差，通过贝塞尔公式，将大于 3 倍标准差的数据剔除，最后统计每天夜天光亮度的最大值均值为 21.7 mag arcsec^{-2}，另外，图中偏低的数据主要是月光对可见光波段的夜天光亮度影响造成的。

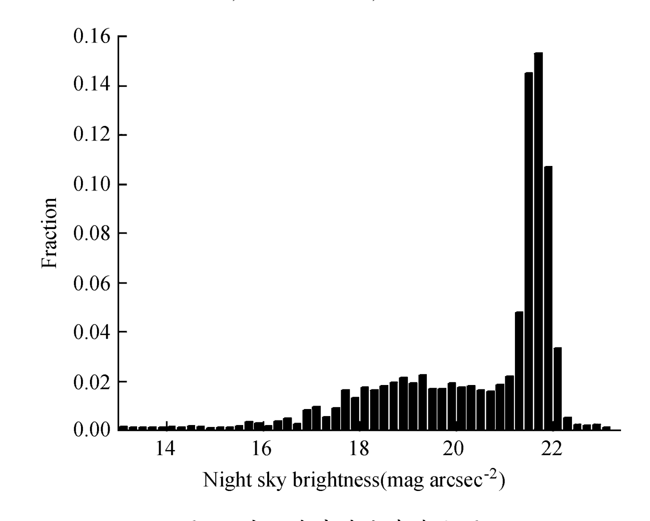


图 4　夜天光亮度分布直方图

Fig. 4　Histograms of Night sky brightness

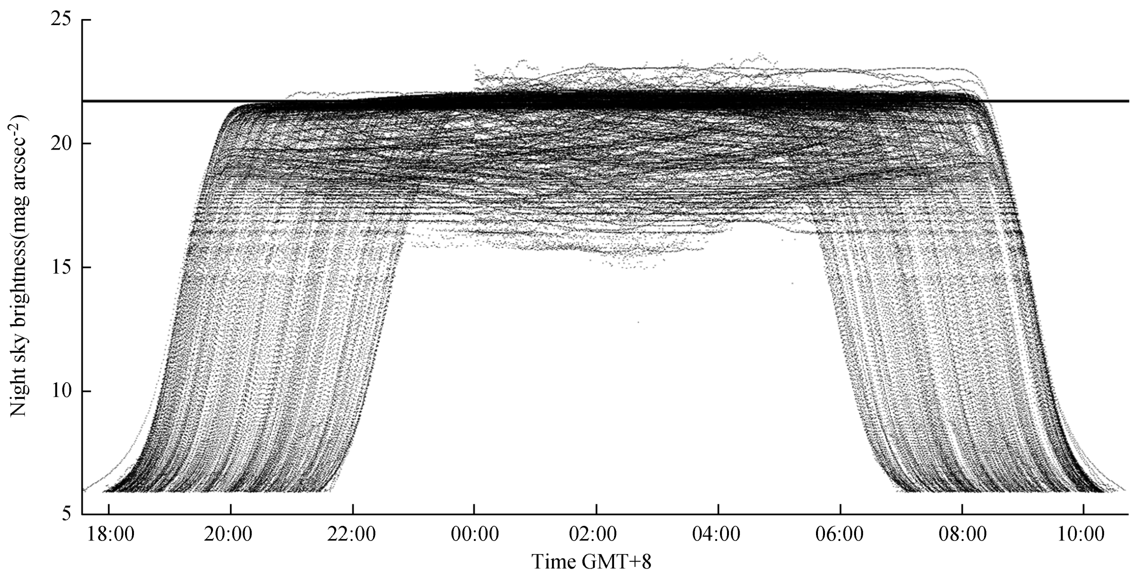


图 5　使用夜天光亮度测量计测量的夜天光亮度

Fig. 5　Night sky brightness measured by SQM

图 6 给出南山站 2006 年 5 月～2016 年 8 月的温度按月统计结果，年平均温度为 3.4 ℃，夏季平均温度为 14.1 ℃，记录最高温度为 30.7 ℃，冬季平均温度为−7.8 ℃，记录最低温度为−31.0 ℃，每月平均温度与中值很接近。春季和冬季的最高温与最低温差较大为 40 ℃左右，夏季和秋季为 30 ℃左右。图 7 给出相对湿度按月统计结果，年平均相对湿度为 57.3%，夏季平均相对湿度为 60.8%，冬季平均相对湿度为 53.0%，每月平均相对湿度与中值很接近。南山夏季雨水较多，7 月、8 月相对湿度较高，分别为 62.7%、60.1%，其他月份相对湿度均小于 60%。

2013 年 7 月至 2016 年 7 月通过自动气象站获得这期间的风速和风向数据，风速为每分钟所测风速的平均值。由图 8 看出，这期间南山站 24 小时主要风向为西南风和西南风偏西，风速主要分布区间为 2～4 m/s。图 9 给出风速频次统计，分析表明，白天平均风速 1.9 m/s，夜间平均风速 1.8 m/s，出现 0.2～1.5 m/s 风频率占 28.7%，1.5～3.3 m/s 风频率占 53.2%，3.3～5.4 m/s 风频率占 9.8%，5.4～10.7 m/s 风频率出现的概率不足 0.6%，无 6 级以上大风天气(表 1)。

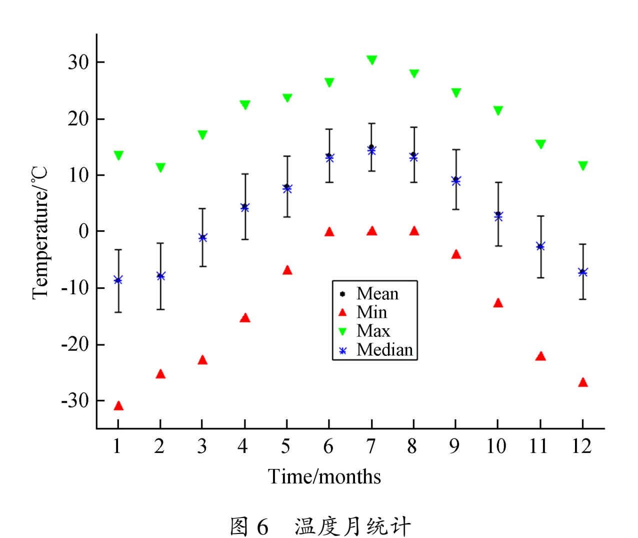


图 6 温度月统计

Fig. 6 Monthly statistics of temperature

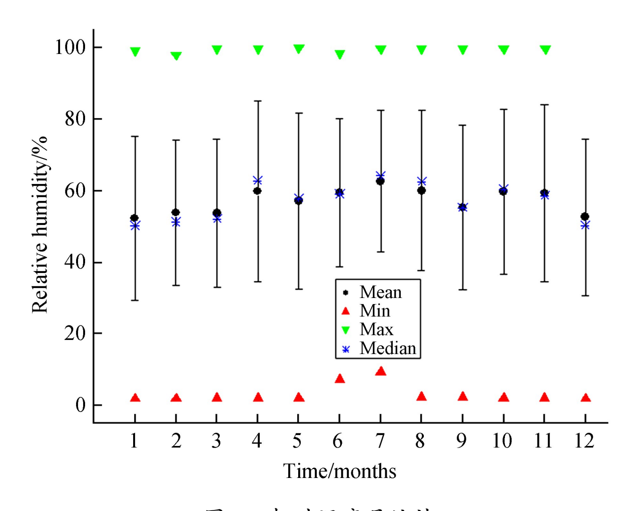


图 7 相对湿度月统计

Fig. 7 Monthly statistics of relative humidity

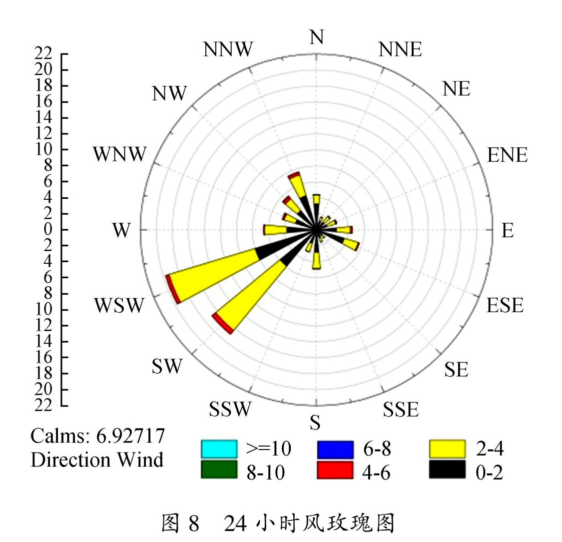


图 8 24 小时风玫瑰图

Fig. 8 Wind rose density on 24h

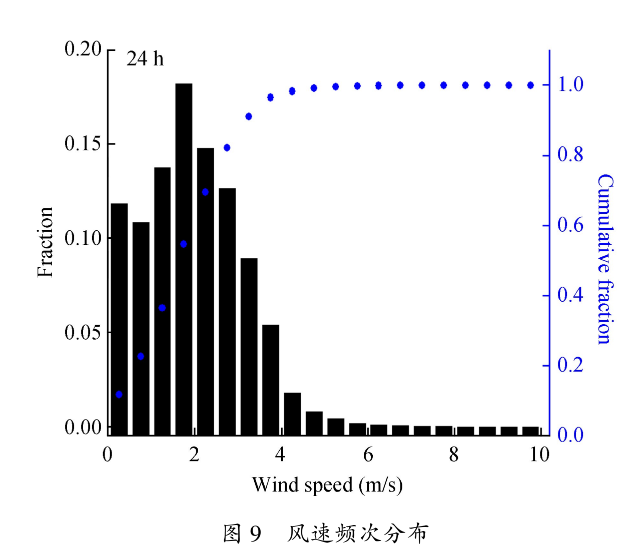


图 9 风速频次分布

Fig. 9 Frequency distribution of wind speed

3 结 论

文章统计了使用 SBIG 视宁度仪得到南山站长期监测的视宁度结果，通过分析得到南山站视宁度均值为 1.74″，中值 1.67″，各季节均值有一定的变化，秋、冬季要优于春、夏季。通过夜天光亮度测量计获得南山站连续 3 年的夜天光亮度监测数据，统计最大值均值为 21.7 mag arcsec^{-2}，比较国内外优秀台址的夜天光亮度，南山站属于优良水平。通过自动气象站获得的历年南山站的气象资料，分析得南山站干燥、少雨，年均温度为 3.4 ℃，相对湿度低于 60%，无 6 级以上大风的记录。虽然在南山站使用的 SBIG 和夜天光亮度测量计不是目前天文界对台址观测环境监测的主流设备，但是通过其测量得到的长期连续的监测数据依然能够在一定程度上反映南山站的光学观测环境良好，适于小型光学望远镜的建设与运行。

表 1 风速分布累计百分比

Table 1 Cumulative percentage of wind distribution

风速(风级)/(m/s)	累计百分比/%
≤0.2 (0 级)	7.80
≤1.5 m/s (1 级)	36.50
≤3.3 m/s (2 级)	89.70
≤5.4 m/s (3 级)	99.40
≤7.9 m/s (4 级)	99.90
>10.7 m/s (5 级)	0.04

参考文献：

[1] 仇朴章，刘忠. 现代天文选址中的视宁度 [J]. 天文学进展，1993，11(1)：55-61.
Qiu Puzhang, Liu Zhong. Seeing in modern astronomical site testing [J]. Progress in Astronomy, 1993, 11(1): 55-61.

[2] 宗伟凯，付建宁，牛家树，等. 2009 年南极冰穹 A 的双色天光背景统计和分析 [J]. 天文研究与技术——国家天文台台刊，2014，11(1)：89-94.
Zong Weikai, Fu Jianning, Niu Jiashu, et al. Sky brightness values in the SDSS g and r Bands at the dome A of the Antarctica in 2009 [J]. Astronomical Research & Technology——Publications of National Astronomical Observatories of China, 2014, 11(1): 89-94.

[3] 谭徽松，李银柱，金振宇. 实测天体物理 [M]. 北京：国防出版社，2014：1-11.

[4] 恒星物理研究室. 滇西宾川选址总结报告 (Ⅱ)——大气宁静度、大气透明度及天空背景亮度 [J]. 云南天文台台刊，1981(1)：18-34.

[5] Fried D L. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion [J]. Journal of the Optical Society of America, 1965, 55(11): 1427-1431.

[6] Danjon A. Vistas in astronomy [M]. New York: Dover Publication, 1955: 377.

[7] King E S. A manual of celestial photography; principles and practice for those interested in photographing the heavens [M]. Boston: Eastern Science Supply Company, 1931: 15-17.

[8] Sarazin M, Roddier F. The ESO differential image motion monitor [J]. Astronomy & Astrophysics, 1990, 227(1): 294-300.

[9] 辛玉新，范玉峰，伦宝利，等. 长期视宁度监测 DIMM 系统设计方案 [J]. 天文研究与技术——国家天文台台刊，2012，9(4)：397-404.
Xin Yuxin, Fan Yufeng, Lun Baoli, et al. A design of a DIMM system for long-term seeing measurement [J]. Astronomical Research & Technology——Publications of National Astronomical Observatories of China, 2012, 9(4): 397-404.

Monitor and Analysis on Optical Observing Conditions at Nanshan Observatory

Hu Ping[1,2], Li Rui[1,3], Wang Na[1,3], Wei Peng[1]
(1. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China, Email: huping@xao.ac.cn;
2. Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: We introduced our approaches on monitoring the astronomical seeing, night sky brightness and weather condition by using the equipment of SBIG、SQM-LE at Nanshan Observatory. Statistical analysis and results are presented and discussed after removing the flawed data. Our analysis revealed an astronomical seeing of about 1.74″, night sky brightness of 21.7mag arcsec^{-2}, average temperature of 3.4℃ and average relative humidity of 57.3% for Nanshan. The winds are in the range of 2-3m/s, most in south-east direction. The long-term observations support Nanshan Observatory to serve as an appropriate site to operate small and middle scale optical telescopes. Furthermore, our results provide comparison and reference information for other optical sites in China.

Key words: Optical observing condition; Seeing; Night sky brightness; Weather condition